

随机弹目交会目标毁伤仿真研究

Simulation analysis on target damage in random projectile-target encounters

黄瀚林^{1,2}, 方林开², 李翔宇^{1*}, 龙汉¹

Huang Han-lin^{1,2}, Fang Lin-kai², Li Xiang-yu^{1*}, Long Han¹

(1. 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国人民解放军 77680 部队, 西藏 山南 856000)

摘要: 为研究基于马尔科夫链的随机炮弹打击对坑道模型的毁伤效果, 根据概率统计方法, 建立 9 门制火炮一次齐射对坑道模型打击的射弹散布图, 而后基于射弹散布图, 建立该射弹散布弹目交会条件下炮弹打击坑道的有限元模型, 根据 CONWEP 方法和表面积毁伤比理论判断其毁伤效果。有限元仿真结果表明, 在随机弹目交会情况下, 坑道模型表面积毁伤比为 0.9472, 论文研究可以为实弹演训打前毁伤评估提供参考。

关键词: 马尔科夫链; 概率统计; 射弹散布; 毁伤评估; 有限元

中图分类号: 038

文献标识码: A

0 引言

当前, 完成实弹演训后的战场效果毁伤评估, 在部队应用较为广泛, 即完成火力打击任务后, 评估对目标的毁伤效果。然而采取打后评估的方法, 无法预测对新目标的毁伤效果, 弹目交会的随机性以及随机弹目交会下对目标的毁伤效果无法获取, 因此, 开展随机条件下弹目交会和目标毁伤仿真研究对于实弹演训打前毁伤评估和弹药数量的精确预测具有重要意义。

近年来, 为提升目标打击和毁伤评估精度, 一些学者针对弹目交会和毁伤评估开展过相关研究。Li 等^[1]研究了一种利用六个屏面传感器和一台面阵相机相结合的弹丸爆炸位置测试方法, 建立了有效弹丸近炸命中目标条件下的目标毁伤概率计算模型; Li 等^[2]在信息不确定的情况下, 将粒子群优化算法与区间数多属性排序方法相结合, 求出博弈的 Nash 均衡, 进而得到一种新的弹目攻防博弈的最优毁伤评估策略方法; 宋娇娇^[3]针对坦克炮的毁伤效能模型构建和数值仿真, 通过对毁伤底事件进行研究, 分析了弹目距离和攻击角度对毁伤概率的影响, 建立了坦克毁伤概率数学模型; 王海坤等^[4]结合毁伤树、随机过程、模糊度、经验层次法、马尔科夫链等系统工程技术, 建立了基于模糊随机理论的舰船易损性评估模型; 黄瀚林等^[5-8]采取 CONWEP 方法和表面积毁伤比理论, 通过对无人机毁伤碉堡、碉堡群进行有限元分析, 进行指定弹目交会毁伤碉堡的参数化建模并获得目标毁伤仿真数据, 为部队进行目标的打前评估提供参考。采用可靠的方法对弹目交会过程进行预测, 并在相应弹目交会条件下对炮弹毁伤目标进行仿真, 将有助于部队实弹演训打前毁伤评估工作的开展, 但目前大多数研究的内容与部队实弹演训状态相差较大, 难以为部队开展相关任务提供可靠保障。

为研究基于马尔科夫链的随机炮弹打击对坑道模型的毁伤效果，论文首先基于统计学的方法，建立 9 门火炮一发炮弹齐射的弹目交会模型，并绘制弹目交会射弹散布图，而后基于弹目交会射弹散布图，根据爆炸冲击经验模型 (Conventional Weapons Effects Program, CONWEP) 理论，建立坑道有限元模型，对弹目交会射弹散布图对应的炮弹打击坑道展开动力学仿真模拟，并基于表面积毁伤比理论对其毁伤效果进行评估，为部队开展实弹演训工作提供参考依据。

1 炮弹弹目交会射弹散布

火炮在对目标进行射击时，每门火炮发射炮弹命中目标的概率，与之前发射炮弹命中概率无关，火炮发射事实上属于一个时间和空间离散的马尔科夫链随机过程，基于该过程，建立 9 门制火炮发射炮弹的统计学模型，并绘制射弹散布图。

1.1 基于马尔科夫链的火炮发射随机过程

为提升火炮完成打击后的生存能力，火炮打击追求快速反应，因此，每门火炮在阵地发射不超过 2 门炮弹。此处以 9 门制火炮在一个阵地齐射 9 发炮弹（每门火炮各发射 1 枚炮弹）为例进行分析。同时，考虑到各门火炮存在系统误差，炮手反应能力各不相同存在随机误差，在进行齐射时，事实上构成一个时间和状态离散的马尔科夫链，即每门火炮发射炮弹命中的概率，都和其余火炮发射命中的概率无关，仅和火炮与炮手本次发射的状态相关，同时火炮和炮手本次发射的状态，仅和上次发射完毕后的状态相关，由此建立火炮发射随机过程数学模型。

已知 t_{n-1} 时刻火炮和炮手的发射及发射完毕状态为 x_{n-1} ， t_n 时刻火炮和炮手的发射及发射完毕状态为 x_n ，则每门火炮命中目标的概率 P 满足

$$P\{X(t_n) = x_n\} = P\{X(t_n) = x_n | X(t_{n-1}) = x_{n-1}\} \quad (1)$$

由式(1)可见，每门火炮命中目标的概率同样属于与前 1 次发射状态相关的条件概率。

1.2 射弹散布统计学模型

某坑道模型入口宽 2.2 m、高 1.9 m，坑道干路全长 50 m；在距离坑道入口 10 m 的位置，向左右两边引出长 3.2 m、宽 2.2 m 和高 1.9 m 的坑道第 1 段支路，分别通向 2 个功能帐篷；坑道第 1 段支路继续向前 25.6 m，向左右两边引出长 3.2 m、宽 2.2 m 和高 1.9 m 的坑道第 2 段支路，分别通向另外 2 个功能帐篷；连接坑道 2 段支路放置各功能帐篷的位置，其空间大小为长 23 m、宽 17 m 和高 5 m，该坑道模型 CAD 平面布局图如图 1 所示，该研究中仅考虑中部坑道建模。

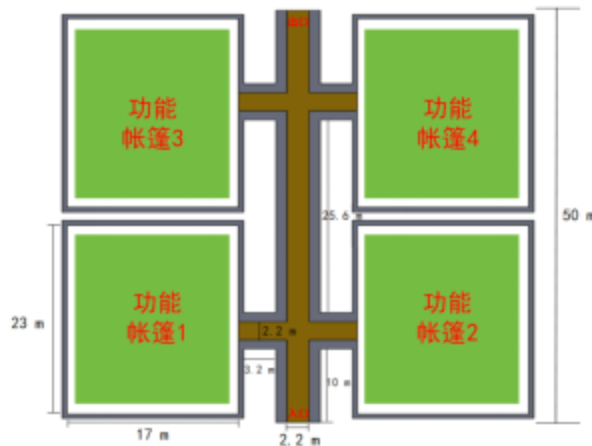


图 1 坑道模型平面布局图

基于上述坑道模型，结合概率论与数理统计相关原理，建立火炮射击射弹散布图。

根据历史射弹次数 n ，火炮每次射击的落点坐标 (x_i, y_i) ，可以计算得出 x, y 两个方向的平均值

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (2)$$

从而计算得出 x, y 两个方向的落点方差为

$$\begin{cases} S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \\ S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \end{cases} \quad (3)$$

当历史射弹数 n 足够大时，可以认为其射弹落点标准差

$$\begin{cases} \sigma_x = S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \sigma_y = S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \end{cases} \quad (4)$$

射弹散布基本服从于二维高斯正态分布，可以认为随机变量 x, y 是独立的，即相关性为 0，其分布概率密度函数为

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (5)$$

从而每门火炮的命中概率

$$P = \iint_{S_T} p(x, y) dx dy \quad (6)$$

其中 S_T 为坑道的俯视面积。将目标中心坐标定为 $(0,0)$ ，此时目标中心坐标和坑道几何中心坐标重合，对某型火炮 x 方向和 y 方向的射弹散布进行统计，得到其落点标准差

$$\sigma_x = \sigma_y = 2.5 \quad (7)$$

将坑道模型平面布局图的中部坑道绘制进入坐标轴内，并结合式(1)至式(7)建立射弹散布数学模型，由此可以得到弹目交会射弹散布图如图 2 所示。

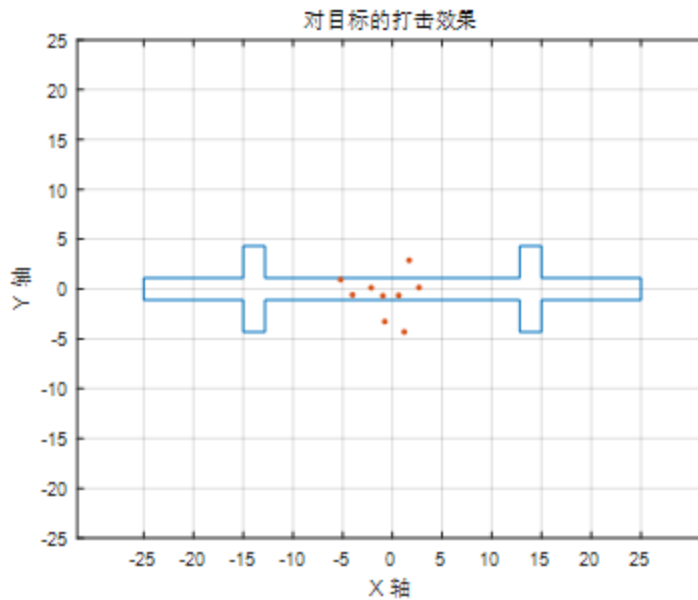


图2 炮目交会射弹散布图

由图2可以看出,由于火炮的落点标准差较小,9门制火炮各发射1枚炮弹,其射弹散布集中于坑道的中部及中部两侧。根据图2,建立基于射弹散布的坑道毁伤有限元模型,并进行动力学仿真和毁伤评估。

2 基于射弹散布的坑道毁伤有限元仿真

首先基于图1,构建坑道的三维有限元模型;考虑到坑道模型为工程建筑,主要通过冲击波超压进行毁伤,而后根据图2获得的弹目交会射弹散布,在坑道模型中建立弹药爆炸点,通过爆炸载荷的CONWEP算法进行动力学仿真,获得坑道模型的毁伤效果;最后通过表面积毁伤比判据理论对坑道模型进行毁伤评估。

2.1 爆炸载荷的CONWEP算法和表面积毁伤比判据理论

CONWEP算法是基于美国军方的载荷库,这种算法是建立在大量爆炸试验的基础上,通过爆距和炸药量拟合出爆炸冲击波超压的经验公式,这个公式在给定爆距和炸药量的情况下,就能给出结构物上不同位置冲击波超压的时间历程曲线,同时这种算法无需建立空气单元,从而大大提高了数值仿真的计算效率,由于这种算法不仅考虑了爆炸冲击波的入射与反射,而且考虑了空间和时间两个维度上冲击波的变化规律,使得此方法在爆炸模拟仿真中具有较高的精度,目前该方法已集成到Abaqus等有限元分析软件当中。

根据CONWEP经验模型算法,冲击波超压的计算主要根据炸药的能量和爆距来计算,在冲击波超压的计算公式中炸药的能量和距离可用比例距离 Z 代表,有

$$Z = \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \quad (8)$$

式中: W 为炸药量,单位为kg; R 为爆距,单位为m;爆炸冲击波超压 P_s ,单位为 10^5Pa ;其中,冲击波超压 P_s 可表示为关于比例距离 Z 的函数,即

$$P_s = f(Z) \quad (9)$$

将式(9)展开为幂级数,其形式为

$$P_s=f(Z)=a_0+\frac{a_1}{Z}+\frac{a_2}{Z^2}+\frac{a_3}{Z^3}+\dots \quad (10)$$

式(10)中 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 ... 是爆炸环境决定的系数，主要由爆炸实验给出，这里采用最为经典的亨利奇爆炸冲击波超压经验公式

$$P_s=\begin{cases} \frac{1.40717}{Z}+\frac{0.55397}{Z^2}-\frac{0.03572}{Z^3}+\frac{0.000625}{Z^4}, & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\ \frac{0.61938}{Z}-\frac{0.03262}{Z^2}+\frac{0.21324}{Z^3}, & 0.3 \leq Z \leq 1 \\ \frac{0.0662}{Z}+\frac{0.405}{Z^2}+\frac{0.3288}{Z^3}, & 1 \leq Z \leq 10 \end{cases} \quad (11)$$

通过表面积毁伤比的方法，来评估坑道模型的毁伤程度^[10]。首先求得建筑物毁伤表面积 $DamageArea$ ，再根据毁伤前建筑物的面积 $PriArea$ ，计算表面积毁伤比公式为：

$$DamageAreaRatio = \frac{DamageArea}{PriArea} \times 10 \quad (12)$$

表面积毁伤比值越大，建筑物目标表面毁伤程度越严重，通过表面积毁伤比作为坑道模型毁伤评估的依据。

2.2 坑道有限元建模

由于弹药在爆炸时主要通过其爆炸产生的冲击波超压对工程结构产生破坏效应，此处采用 Abaqus 商业有限元软件模仿冲击波超压毁伤坑道模型。Abaqus 有限元软件在完成爆炸等显式动力学分析方面具有较为成熟的功能，其内置的 CONWEP 算法可用来计算爆炸产生的冲击波超压对结构的破坏效应。在求解爆炸等显式动力学问题时，若构建工程结构的三维实体模型且采用体单元划分有限元网格，会因为计算结果中体单元内应力为常值降低计算精度。考虑到单元间应力不连续的实际，将坑道模型简化为壳模型，并采用壳单元划分有限元网格。

采用 Abaqus 软件的 Mesh 模块自带的 4 节点双曲薄壳单元 (A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains, S4R 单元)，网格尺寸为 0.2m，网格数量为 8710，该单元能较好地模拟大变形、大应变的能力，可较为准确地分析结构的变形和应力。元素控制设定为“允许元素删除 (Element deletion)”，初始接触设定为“一般接触”，最终接触设定为“爆炸接触”，以某型榴弹炮为例，每发炮弹所含 TNT 当量为 25kg，炸点位置与图 2 一一对应，在坑道有限元模型周围设定引爆点 RP-1 至 RP-9，如图 3 所示，引爆面为坑道模型外表面。

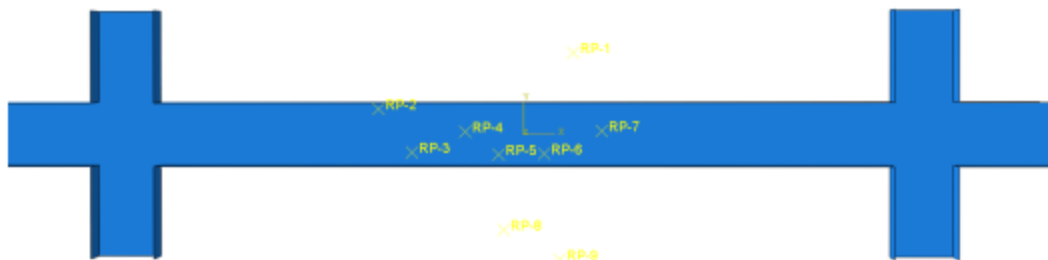


图 3 射弹散布图对应的坑道有限元模型和引爆点位置

根据 Abaqus 的变形云图分析爆炸产生的冲击波超压对坑道模型的毁伤效果：若有限元分析所得的变形云图中，有限元网格未离开通道本体但产生一定数值，则发生变形；若有限元网格离开通道本体，则造成了破坏。变形和破坏网格面积总和，即为式(12)中的建筑物毁伤表面积 $DamageArea$ 。结合坑道模型的构工方式，边界条件设为下端固支，其网格划分、爆炸接

触设定和边界条件设置如图 4-图 6 所示。

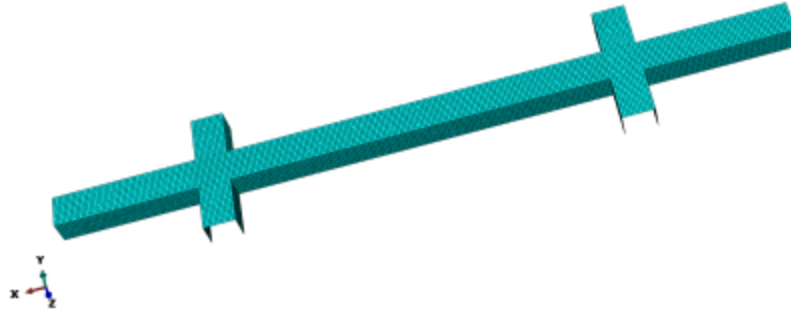


图 4 有限元模型网格划分

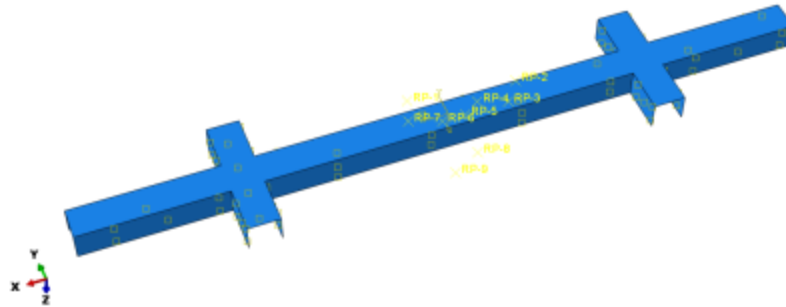


图 5 爆炸接触设置

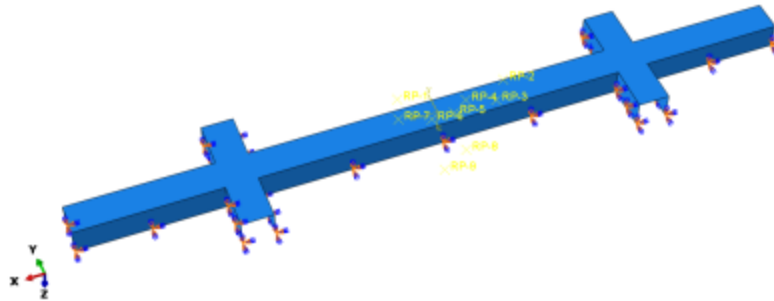


图 6 边界条件设置

坑道模型侧壁厚度为 1.1 m，顶部厚度为 0.5 m，其材质为混凝土材质，内部用防爆笼加固，其杨氏模量为 39.2 GPa，泊松比为 0.18，密度为 2450 kg/m³，爆炸冲击下断裂应变平均值取为 0.02，断裂应力为 30.2 MPa。

2.3 基于射弹散布图的炮弹打击坑道有限元分析

对上述坑道在 9 个爆炸点冲击波超压下进行毁伤有限元分析，获得的变形破坏云图如图 7 所示。

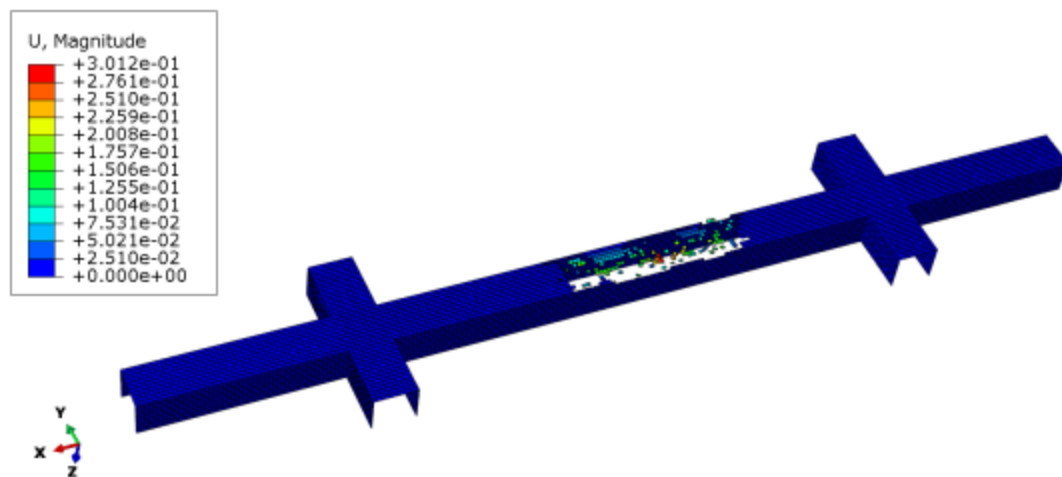


图7 坑道模型变形破坏云图

通过图7可以看出,该射弹散布条件下,最终表面积毁伤比为0.9472。虽然对坑道模型顶部和侧面均有射弹产生冲击波超压的破坏效果,但对坑道模型顶部的破坏效果要明显强于两侧的破坏效果。分析其主要原因为:坑道模型侧壁厚度较大,且爆炸点较为稀疏,侧壁外表面在受到炮弹爆炸产生的冲击波超压后,冲击波超压向四周反射,对侧壁的影响程度较小;而顶部厚度较小,且顶部爆炸点较为密集,冲击波传播的范围增大,冲击波超压对顶部造成了较大程度的破坏。

3 结论

论文研究基于马尔科夫链的随机炮弹打击对坑道模型的毁伤效果,通过概率统计的方法获得9门火炮随机打击下的射弹散布,并基于射弹散布,通过CONWEP经验模型算法和表面积毁伤比理论判据,对爆炸产生的冲击波超压毁伤坑道模型展开有限元分析,得出的结论如下:

- 1) 坑道模型在9门火炮齐射各1门炮弹的表面积毁伤比为0.9472。
- 2) 在随机炮弹打击下,坑道模型侧壁能够较好地抵御射弹产生的破坏。
- 3) 在随机炮弹打击下,坑道模型的顶部难以抵御射弹产生的破坏。

相关研究可为坑道模型的构工和防护提供参考,同时也可进一步对坑道模型进行优化,如通过增加坑道模型顶部厚度,或是改变顶部形状等方式,降低坑道模型顶部的易损性,提升坑道模型的安全性。该研究能够极大降低毁伤评估的成本,相关方法也能为部队实弹演训打前评估提供参考。

参考文献

- [1] Hanshan Li, Liping Lu, Xiaoqian Zhang, et al. Space Projectile Explosion Position Parameters Measurement Method and Target Damage Probability Calculation Analysis[J]. IEEE, 2021, 1(29): 118-126.
- [2] Hanshan Li, Yun Hao, Xiaoqian Zhang. Offensive/Defensive Game Target Damage Assessment Mathematical Calculation Method between the Projectile and Target[J]. Mathematics, 2022, 10(4291): 1-15.
- [3] 宋娇娇. 具有射击门体制的坦克炮毁伤效能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018: 43-55.
- [4] 王海坤, 刘建湖, 张效慈, 等. 基于模糊随机理论的舰船易损性评估模型[J]. 兵工学报, 2016, 37(1): 57-64.
- [5] 黄翰林, 岳增营, 彭琪, 等. 基于CONWEP方法的无人机投弹毁伤仿真分析[C]. 中国力学学会产学研工作委员会. 第20届中国CAE工程分析技术年会论文集. 北京: 北京诺维特机械科学技术发展中心, 2024:

96-100.

- [6] 黄翰林, 弹增达瓦. 基于 CONWEP 方法的无人机投弹毁伤碉堡群仿真分析[J]. 兵器试验, 2024, 52(4): 45-53.
- [7] 胡唐胜, 黄翰林, 熊勇军, 等. 基于防御掩体的无人机投弹杀伤爆距仿真评估[J]. 军事交通学报, 2024, 3(11): 91-94.
- [8] 黄翰林, 李骐, 廖崇庆, 等. 基于 CONWEP 的无人机投弹毁伤防御碉堡参数化模型开发[J]. 装甲兵学报, 2024, 3(16): 97-103.
- [9] 卢芳云, 蒋邦海, 李翔宇, 等. 武器战斗部投射与毁伤[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 59-63.
- [10] 王俊, 雷宏宇. 基于有限元仿真结果识别的建筑物毁伤评估[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(7): 29-34.

第一作者: 黄翰林, 国防科技大学博士研究生, 中国人民解放军 77680 部队助理工程师, 从事毁伤评估, 手机: 15150699305, E-mail:33703677@qq.com, 邮编: 410073, 地址: 湖南省长沙市开福区福元路 1 号。

通信作者: 李翔宇, 博士生导师, 国防科技大学教授, 从事毁伤评估。